

УДК 524.335.6; 524.3-563; 520.82

ОТКРЫТИЕ НОВЫХ ЗВЕЗД ТИПА  $\delta$  ЩИТА© 2022 Ё. Кирмизиташ<sup>1\*</sup>, С. Чавуш<sup>1</sup>, Ф. Кахраман Аличавуш<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Университет Чанаккале 18 марта, Факультет наук и искусств, отделение физики, 17100, Чанаккале, Турция<sup>2</sup> Университет Чанаккале 18 марта, Центр астрофизических исследований и Обсерватория Улупынар, 17100, Чанаккале, Турция

Поступила в редакцию 4 декабря 2021 года; после доработки 30 марта 2022 года; принята к публикации 15 июня 2022 года

Пульсирующие звезды — особенные объекты в звездной астрофизике. Частоты их пульсаций позволяют нам исследовать внутреннюю структуру звезд. Одной из наиболее известных групп пульсирующих звезд являются переменные типа  $\delta$  Щита ( $\delta$  Scuti), изучение которых может способствовать пониманию механизма передачи энергии в звездах спектральных классов А–F. Поэтому в данном исследовании мы сосредоточились на поиске звезд типа  $\delta$  Щита. В своей работе мы руководствовались несколькими критериями. Сперва в базе данных TESS мы выявили несколько одиночных звезд, которые демонстрируют пульсации и поведение, характерное для объектов такого типа. С учетом второго критерия — диапазонов  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ , обычно составляющих у звезд типа  $\delta$  Щита 6300–8500 К и 3.2–4.3 соответственно, для исследования мы выбрали те объекты, параметры  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  которых оказываются в пределах этих диапазонов. Еще одним критерием является частота пульсаций. Частотный анализ был проведен для всех звезд из списка кандидатов. Кроме того, для вычисления пульсационных констант и отображения положений объектов исследования на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (H–R) мы определили их параметры  $M_V$ ,  $L$  и  $M_{\text{bol}}$ . Окончательная классификация типов пульсаций звезд была сделана с учетом частотных диапазонов и пульсационных постоянных. В результате были обнаружены пять звезд типа  $\delta$  Scuti, одна звезда типа  $\gamma$  Doradus и четыре гибридные системы.

Ключевые слова: *звезды: переменные:  $\delta$  Щита — звезды: колебания — методы: фотометрические*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Астеросейсмология — мощный инструмент для исследования внутренней структуры звезд с помощью изучения режимов их колебаний. Основными объектами астеросейсмологии являются пульсирующие переменные. Существует множество пульсирующих звезд, которые изучаются на протяжении десятилетий. К ним относятся  $\beta$  Цефея ( $\beta$  Cephei),  $\delta$  Щита ( $\delta$  Scuti) и цефеиды. Внутри группы пульсирующих переменных значительное место в астеросейсмологии занимают осциллирующие звезды главной последовательности классов А–F. Они расположены в переходной области, в которой конвекционные оболочки звезд сменяются радиационными (Aerts et al. 2010). Для понимания механизма, действующего в этой переходной области, исследования пульсирующих звезд классов А–F очень важны.

В основном существуют два типа пульсирующих переменных классов А–F главной последовательности:  $\delta$  Scuti ( $\delta$  Sct) и  $\gamma$  Doradus ( $\gamma$  Dor). Звезды

типа  $\delta$  Sct имеют диапазон спектральных классов А0–F5 и светимость, меняющуюся от карлика до гиганта (Chang et al. 2013). Эти переменные демонстрируют радиальные и нерадиальные пульсации с общим диапазоном частот 5–50 сут<sup>-1</sup> (Aerts et al. 2010, Breger 2000). Звезды типа  $\gamma$  Dor являются карликовыми и/или субкарликовыми переменными спектральных классов А7–F5 (Kaye et al. 1999). Для этих переменных характерны нерадиальные пульсации с частотой, как правило, ниже 5 сут<sup>-1</sup> (Kaye et al. 1999, Uytterhoeven et al. 2011). Полосы неустойчивости пульсирующих звезд классов А–F расположены в нижней части классической полосы неустойчивости и частично перекрываются. В этой перекрывающейся части предполагалось существование гибридных звезд типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor (Breger and Beichbuchner 1996, Dupret et al. 2004, Handler and Shobbrook 2002). Эти гибридные переменные могут также называться гибридами классов А–F и демонстрируют колебания типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor одновременно.

Большой прорыв в изучении пульсирующих переменных классов А–F был достигнут благода-

\*E-mail: ozlemkirmizitas1907@gmail.com

ря наблюдениям на космических телескопах. В частности, значительный вклад внесли высококачественные данные телескопа Кеплер (Kepler) (Borucki et al. 2010). Uytterhoeven et al. (2011) изучили данные Kepler о 750 пульсирующих звездах классов A–F и выявили общие свойства, характерные для этих переменных. Они отметили, что таким пульсирующим объектам присущи определенные особенности. Например, эти авторы указали, что некоторые звезды типа  $\delta$  Sct,  $\gamma$  Dor и/или гибридные звезды могут оказаться за пределами областей, предсказанных теорией. Такая ситуация не укладывается в рамки современных представлений (Dupret et al. 2004; 2005).

Вслед за телескопом Кеплер «поставщиком» высококачественных космических данных о многих звездных системах стала миссия Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) Ricker et al. (2015). Antoci et al. (2019) представили первое исследование пульсирующих звезд классов A–F по TESS-данным. Поскольку TESS наблюдает практически все небо, он является важным инструментом для исследования такого рода переменных и обнаружения новых кандидатов. В этом исследовании мы представляем часть нашей работы по выявлению новых переменных типа  $\delta$  Sct на площадках из архива TESS. Статья организована следующим образом: информация об использованных TESS-данных и критерии выбора объектов приведены в разделе 2, анализу временных рядов посвящен раздел 3, обсуждение и выводы представлены в разделе 4.

## 2. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для поиска новых звезд типа  $\delta$  Sct мы использовали TESS-данные. Основной задачей TESS является обнаружение новых экзопланет, вращающихся вокруг близких звезд (Ricker et al. 2015). TESS был запущен с базы на мысе Канаверал в США в апреле 2018 года с помощью ракеты Falcon 9 производства компании SpaceX. TESS имеет ту же рабочую логику, что и космический телескоп Кеплер, однако Кеплер сканирует более широкую область. TESS оснащен четырьмя идентичными ПЗС-камерами, каждая из которых имеет поле зрения  $24^\circ \times 24^\circ$  (Ricker et al. 2015). Результатом наблюдений на спутнике TESS как в северном, так и в южном полушариях, помимо обнаружения новых экзопланет, стали многочисленные данные о звездных системах (см., например, Antoci et al. (2019)). Фотометрические данные TESS, полученные в двухминутных коротких (SC) и тридцатиминутных длинных (LC) каденциях в

течение первых двух лет миссии, опубликованы в архиве MAST<sup>1</sup>.

В настоящей работе мы представляем часть нашего исследования площадок TESS, направленного на обнаружение неизвестных переменных типа  $\delta$  Sct. SC-данные TESS, взятые из MAST-архива, были проверены на предмет поиска переменных звезд. При выборе объектов первым критерием было наличие у них пульсаций на кривой блеска. В этом исследовании мы сосредоточились только на отдельных пульсирующих переменных и исключили затменные двойные переменные. В качестве второго критерия рассматривались эффективная температура ( $T_{\text{eff}}$ ) и диапазон поверхностной силы тяжести ( $\lg g$ ). Звезды типа  $\delta$  Sct обычно имеют  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  в диапазонах 6300–8500 K и 3.2–4.3 (Rodríguez and Breger 2001), поэтому мы проверяли величины этих параметров у систем, удовлетворяющих первому критерию. Значения  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  для выбранных систем были взяты из данных TIC (TESS Input Catalog, Stassun et al. (2019)). В результате были отобраны звезды с величинами  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$ , лежащими в заданных диапазонах. Последним критерием было отсутствие упоминаний о звездной системе в литературных источниках. Поэтому на заключительном этапе мы проверили имеющуюся в публикациях информацию о звездах, которые удовлетворили двум первым критериям, и определили системы, неизвестные ранее. Окончательный список был составлен с учетом этих трех критериев. Он приведен в таблице 1. Для подтверждения пульсационного характера переменности выбранных объектов требуется детальный анализ данных TESS. Поэтому мы использовали все SC-данные о рассматриваемых системах. Были учтены оценки потоков, полученные с помощью простой апертурной фотометрии (SAP), которые мы преобразовали в звездные величины. Окончательно TESS-данные были нормализованы с помощью полиномиальной подгонки для устранения возможных инструментальных эффектов.

## 3. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ

Для выявления характеристик пульсаций выбранных звезд мы провели частотный анализ. Использовались все доступные SC-данные исследуемых систем, поскольку частота данных SC по Найквисту достигает  $360 \text{ сут}^{-1}$ . С учетом диапазона периодов пульсаций звезд типа  $\delta$  Sct данные SC подходят для поиска колебаний блеска у подобных объектов. При частотном анализе использовалась программа Period04 (Lenz and Breger 2005). На основе преобразования Фурье и нелинейной подгонки методом наименьших квадратов

<sup>1</sup><https://mast.stsci.edu>

**Таблица 1.** Информация об объектах. Параметры и их средние ошибки были взяты из TIC (Stassun et al. 2019)

TIC	Alternative name	RA (J2000)	Dec (J2000)	$m_{\text{TESS}} \pm 0.006$ , mag	$T_{\text{eff}} \pm 136$ , К	$\lg g \pm 0.08$	TESS Sectors
25537276	HD 221009	23 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> .7	+49°02'54".8	8.52	6866	3.36	16
177422294	HD 223901	23 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup> 29 <sup>s</sup> .7	+43°37'57".0	8.48	7223	3.34	17
252554307	TYC 3626-505-1	23 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 27 <sup>s</sup> .0	+48°24'57".2	8.46	6812	3.81	16
279874050	HD 222170	23 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> .7	+67°55'39".1	8.20	6873		17, 18, 24, 25
308447073	HD 9469	01 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> .9	+48°34'45".1	8.74	7539	4.29	18
367910480	HD 222386	23 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> .1	+75°17'34".3	5.87	8476	4.03	18, 19, 24, 25
370599803	HD 10941	01 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> .2	+54°56'53".3	8.09	7394	3.76	18
395520454	HD 10880	01 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> .0	+73°07'08".2	8.88	7353		25
400502366	HD 10085	01 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> .2	+55°38'16".0	8.15	8261	3.54	18
431375592	HD 219429	23 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> .3	+48°13'05".9	8.72	6411	4.04	16, 17

программа выполняет поиск одиночных и множественных частот с помощью метода «предварительного отбеливания» («pre-whitening») (Handler 2009). С помощью программы *Period04* можно обнаруживать возможные гармонические и комбинированные частоты. Согласно критерию из работы Breger et al. (1993), значимыми считаются частоты, имеющие отношение  $S/N > 4$ . Однако в недавнем исследовании Baran and Koen (2021) было показано, что для космических данных телескопа TESS отношение  $S/N$  должно быть выше, чем обычно используемый критерий Брегера для достоверного

обнаружения частот. Поэтому, принимая во внимание результаты этого исследования, мы считали значимыми частоты с  $S/N > 4.5$ .

В результате анализа мы получили частоты пульсаций объектов нашей выборки. Список первых десяти частот и отношения  $S/N$  для них приведены в таблице 2. Полный список частот доступен в электронном виде. Фурье-спектры изучавшихся звезд и соответствующие наблюдениям теоретические кривые, рассчитанные для найденных частот, показаны на рис. 1.

**Таблица 2.** Результаты частотного анализа. Частоты гармоник и комбинации частот не указаны. Полный список частот приведен в Дополнительных материалах

	Frequency, d <sup>-1</sup>	Amplitude, mmag	Phase, rad	$S/N$
TIC 25537276				
$\nu_1$	7.55054 ± 0.00002	8.872 ± 0.008	0.2364 ± 0.0001	534.6
$\nu_2$	8.03904 ± 0.00008	2.237 ± 0.008	0.6364 ± 0.0006	151.0
$\nu_3$	7.37013 ± 0.00011	1.739 ± 0.008	0.3471 ± 0.0007	107.3
$\nu_4$	5.78908 ± 0.00012	1.506 ± 0.008	0.6576 ± 0.0008	100.5
$\nu_5$	7.04380 ± 0.00026	0.706 ± 0.008	0.1234 ± 0.0018	43.8
$\nu_6$	7.57891 ± 0.00062	0.321 ± 0.008	0.0344 ± 0.0044	19.2
$\nu_7$	15.0991 ± 0.00110	0.168 ± 0.008	0.8044 ± 0.0078	14.3
$\nu_8$	7.65999 ± 0.00474	0.103 ± 0.008	0.9871 ± 0.0337	6.3
$\nu_9$	7.94174 ± 0.00177	0.111 ± 0.008	0.4499 ± 0.0126	7.3
$\nu_{10}$	8.00864 ± 0.00554	0.101 ± 0.008	0.4312 ± 0.0395	6.6
TIC 177422294				
$\nu_1$	8.30240 ± 0.00016	6.863 ± 0.006	0.0739 ± 0.0011	14
$\nu_2$	7.66622 ± 0.00036	3.318 ± 0.006	0.0640 ± 0.0026	6.6
$\nu_3$	7.07205 ± 0.00039	3.208 ± 0.006	0.5485 ± 0.0028	6.1
$\nu_4$	8.204374 ± 0.00028	4.808 ± 0.006	0.918 ± 0.002	9.9
$\nu_5$	8.23038 ± 0.00015	2.438 ± 0.006	0.033 ± 0.001	8.7

Таблица 2. (Продолжение)

	Frequency, $d^{-1}$	Amplitude, mmag	Phase, rad	S/N
$\nu_6$	$8.12435 \pm 0.00081$	$2.438 \pm 0.006$	$0.0852 \pm 0.0064$	5.0
$\nu_7$	$4.51330 \pm 0.00048$	$2.551 \pm 0.006$	$0.8588 \pm 0.0034$	5.3
$\nu_8$	$7.70823 \pm 0.00042$	$2.723 \pm 0.006$	$0.5254 \pm 0.0031$	5.4
$\nu_9$	$8.39643 \pm 0.000224$	$2.929 \pm 0.006$	$0.3438 \pm 0.0016$	6.4
$\nu_{10}$	$5.23151 \pm 0.00056$	$2.272 \pm 0.006$	$0.9086 \pm 0.0041$	5.1
TIC 252554307				
$\nu_1$	$7.57891 \pm 0.00003$	$5.213 \pm 0.008$	$0.3055 \pm 0.0002$	288.6
$\nu_2$	$7.51810 \pm 0.00003$	$5.651 \pm 0.008$	$0.2651 \pm 0.0002$	313.5
$\nu_3$	$8.07147 \pm 0.00015$	$1.321 \pm 0.008$	$0.6219 \pm 0.00107$	77.4
$\nu_4$	$7.45324 \pm 0.00010$	$1.748 \pm 0.008$	$0.8083 \pm 0.0007$	99.1
$\nu_5$	$7.39851 \pm 0.00012$	$1.255 \pm 0.006$	$0.5140 \pm 0.0025$	70.6
$\nu_6$	$8.00458 \pm 0.00053$	$1.532 \pm 0.008$	$0.1942 \pm 0.2702$	89.8
$\nu_7$	$5.76070 \pm 0.00018$	$0.953 \pm 0.008$	$0.5921 \pm 0.0013$	54.9
$\nu_8$	$7.68634 \pm 0.00015$	$0.122 \pm 0.008$	$0.2223 \pm 0.0010$	66.8
$\nu_9$	$7.00933 \pm 0.00066$	$0.262 \pm 0.008$	$0.72455 \pm 0.0047$	14.9
$\nu_{10}$	$7.79377 \pm 0.00054$	$0.144 \pm 0.008$	$0.1784 \pm 0.0038$	8.16
TIC 279854050				
$\nu_1$	$12.85860 \pm 0.00032$	$9.709 \pm 0.001$	$0.3965 \pm 0.1035$	62.6
$\nu_2$	$11.55165 \pm 0.00003$	$4.149 \pm 0.005$	$0.0212 \pm 0.0024$	29.7
$\nu_3$	$12.86759 \pm 0.00016$	$5.091 \pm 0.001$	$0.3965 \pm 0.0081$	32.8
$\nu_4$	$12.69569 \pm 0.00026$	$2.476 \pm 0.001$	$0.0211 \pm 0.0081$	28.4
$\nu_5$	$12.89069 \pm 0.00015$	$2.438 \pm 0.006$	$0.2630 \pm 0.0025$	14.7
$\nu_6$	$12.90520 \pm 0.00039$	$2.375 \pm 0.006$	$0.2702 \pm 0.0046$	15.4
$\nu_7$	$12.84552 \pm 0.00054$	$1.608 \pm 0.004$	$0.7985 \pm 0.0052$	10.1
$\nu_8$	$11.58353 \pm 0.00065$	$1.327 \pm 0.0042$	$0.7832 \pm 0.0054$	9.2
TIC 308447073				
$\nu_1$	$3.39196 \pm 0.00003$	$1.820 \pm 0.008$	$0.9407 \pm 0.0007$	104.8
$\nu_2$	$3.57380 \pm 0.00040$	$0.535 \pm 0.008$	$0.7289 \pm 0.0026$	30.7
$\nu_3$	$3.71073 \pm 0.00015$	$0.358 \pm 0.008$	$0.1172 \pm 0.0035$	21.3
$\nu_4$	$3.43462 \pm 0.00010$	$0.380 \pm 0.007$	$0.5469 \pm 0.0039$	21.4
$\nu_5$	$3.35380 \pm 0.00012$	$0.318 \pm 0.006$	$0.2343 \pm 0.0044$	18.1
TIC 367910480				
$\nu_1$	$15.6652 \pm 0.00003$	$0.516 \pm 0.008$	$0.5253 \pm 0.0025$	22.8
$\nu_2$	$4.04676 \pm 0.00002$	$0.464 \pm 0.006$	$0.5525 \pm 0.0023$	8.5
$\nu_3$	$6.10102 \pm 0.00004$	$0.438 \pm 0.007$	$0.3323 \pm 0.0034$	10.9
$\nu_4$	$19.87434 \pm 0.00004$	$0.379 \pm 0.007$	$0.4481 \pm 0.0028$	21.7
$\nu_5$	$3.64199 \pm 0.00004$	$0.340 \pm 0.006$	$0.8268 \pm 0.0031$	6.3
$\nu_6$	$2.59348 \pm 0.00004$	$0.298 \pm 0.006$	$0.3935 \pm 0.0035$	6.1
$\nu_7$	$3.34585 \pm 0.00004$	$0.285 \pm 0.006$	$0.0536 \pm 0.0037$	5.1
$\nu_8$	$3.34585 \pm 0.00004$	$0.285 \pm 0.006$	$0.0536 \pm 0.0037$	5.1
$\nu_9$	$3.54846 \pm 0.00003$	$0.275 \pm 0.006$	$0.0332 \pm 0.0039$	4.9
$\nu_{10}$	$5.76989 \pm 0.00005$	$0.245 \pm 0.006$	$0.3817 \pm 0.0043$	5.3

Таблица 2. (Продолжение)

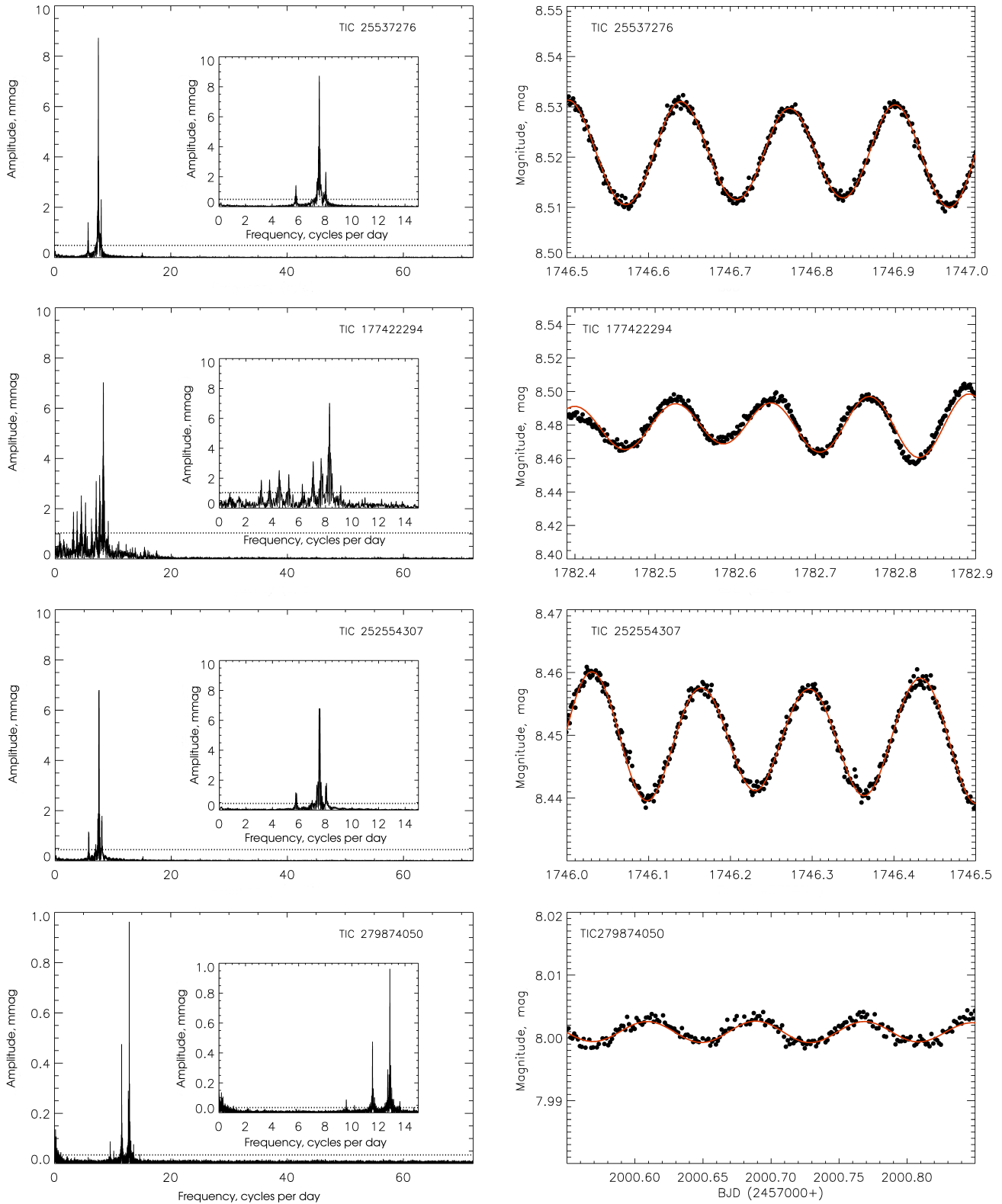
	Frequency, d <sup>-1</sup>	Amplitude, mmag	Phase, rad	S/N
TIC 370599803				
$\nu_1$	18.32261 ± 0.00009	3.664 ± 0.001	0.9809 ± 0.0006	84.5
$\nu_2$	9.19831 ± 0.00010	3.507 ± 0.001	0.5446 ± 0.0007	51.8
$\nu_3$	9.80307 ± 0.00015	2.270 ± 0.001	0.6731 ± 0.0011	36.1
$\nu_4$	9.86653 ± 0.00010	1.948 ± 0.001	0.1550 ± 0.0013	30.5
$\nu_5$	12.63869 ± 0.00012	1.509 ± 0.006	0.35997 ± 0.0016	23.5
$\nu_6$	8.72465 ± 0.00053	1.256 ± 0.001	0.9525 ± 0.0019	23.6
$\nu_7$	10.05893 ± 0.00018	1.207 ± 0.001	0.3085 ± 0.0020	18.6
$\nu_8$	10.92167 ± 0.00015	1.121 ± 0.008	0.0247 ± 0.0020	25.7
$\nu_9$	13.64733 ± 0.00066	8.735 ± 0.008	0.0247 ± 0.0028	13.7
$\nu_{10}$	11.41436 ± 0.00054	0.826 ± 0.008	0.3125 ± 0.0029	16.0
TIC 395520454				
$\nu_1$	2.82490 ± 0.00052	1.924 ± 0.006	0.5297 ± 0.0009	44.1
$\nu_2$	2.76637 ± 0.00118	1.870 ± 0.003	0.9027 ± 0.0009	42.5
$\nu_3$	3.06876 ± 0.00016	1.363 ± 0.001	0.0541 ± 0.0012	31.7
$\nu_4$	2.56933 ± 0.00015	0.261 ± 0.006	0.8112 ± 0.0025	5.9
$\nu_5$	3.38871 ± 0.00092	0.219 ± 0.001	0.398 ± 0.0068	5.1
$\nu_6$	2.98097 ± 0.00102	0.219 ± 0.001	0.0258 ± 0.0072	5.5
$\nu_7$	6.14338 ± 0.00132	0.186 ± 0.001	0.0336 ± 0.0093	6.8
TIC 400502454				
$\nu_1$	6.59953 ± 0.00007	3.398 ± 0.001	0.4157 ± 0.0005	112.2
$\nu_2$	5.93556 ± 0.000132	2.003 ± 0.001	0.8206 ± 0.0009	57.9
$\nu_3$	3.71104 ± 0.00011	1.192 ± 0.001	0.0247 ± 0.0015	26.8
$\nu_4$	7.95496 ± 0.00011	1.157 ± 0.001	0.3522 ± 0.0015	43.3
$\nu_5$	1.35331 ± 0.00011	0.598 ± 0.001	0.4110 ± 0.0030	10.1
$\nu_6$	9.64449 ± 0.00011	0.581 ± 0.001	0.4577 ± 0.0031	21.6
$\nu_7$	4.68162 ± 0.00011	0.468 ± 0.001	0.6521 ± 0.0038	10.8
TIC 431375592				
$\nu_1$	4.86512 ± 0.00005	19.915 ± 0.009	0.0034 ± 0.0007	756.6
$\nu_2$	2.43893 ± 0.00014	2.912 ± 0.009	0.0833 ± 0.0002	56.2
$\nu_3$	2.39483 ± 0.00024	1.902 ± 0.009	0.9105 ± 0.0003	36.3
$\nu_4$	2.37720 ± 0.00033	0.907 ± 0.009	0.56145 ± 0.0006	17.2

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В этом исследовании мы представляем анализ некоторых звезд класса A–F по данным TESS и выявляем их пульсационные характеристики. Объекты мы отбирали с помощью просмотра площадок TESS, учитывая такие критерии, как  $T_{\text{eff}}$  и частотный диапазон объектов. Для выбранных систем был проведен частотный анализ и определены все значимые частоты. Чтобы классифицировать тип пульсации каждого объекта, мы также вычислили его пульсационную постоянную и проанализировали положение на диаграмме Гершпрунга–

Рассела. Для этого были получены некоторые важные параметры объектов. Коэффициент экстинкции  $A_V$  мы определяли по картам галактической экстинкции (Amôres and Lépine 2005) с учетом галактических координат и параллаксов Gaia EDR3 (Smart et al. 2021) объектов. Рассчитанные коэффициенты затем использовались для вычисления абсолютной величины  $M_V$ , светимости  $L$  и болометрической величины  $M_{\text{bol}}$  этих звезд таким же образом, как описано в работе Poro et al. (2021). Рассчитанные параметры приведены в таблице 3.

Полученные оценки были использованы для вы-



**Рис. 1.** Фурье-спектры исследованных звезд и теоретические кривые (сплошные красные линии) рассчитанные с частотами, которые получены для соответствующих наблюдательных данных (черные точки). Пунктирные линии в фурье-спектрах соответствуют уровню  $4.5\sigma$ .

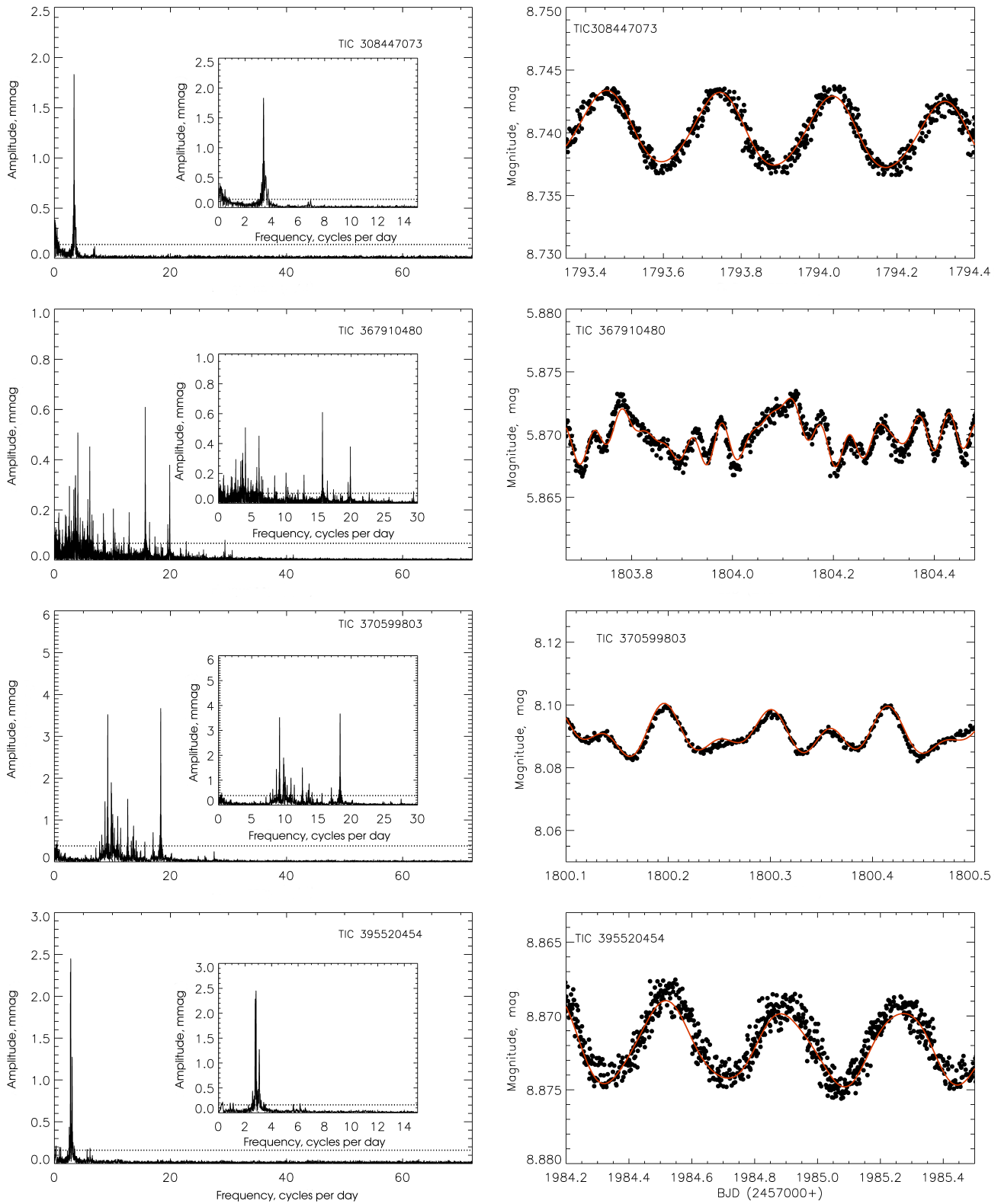


Рис. 1. Продолжение.

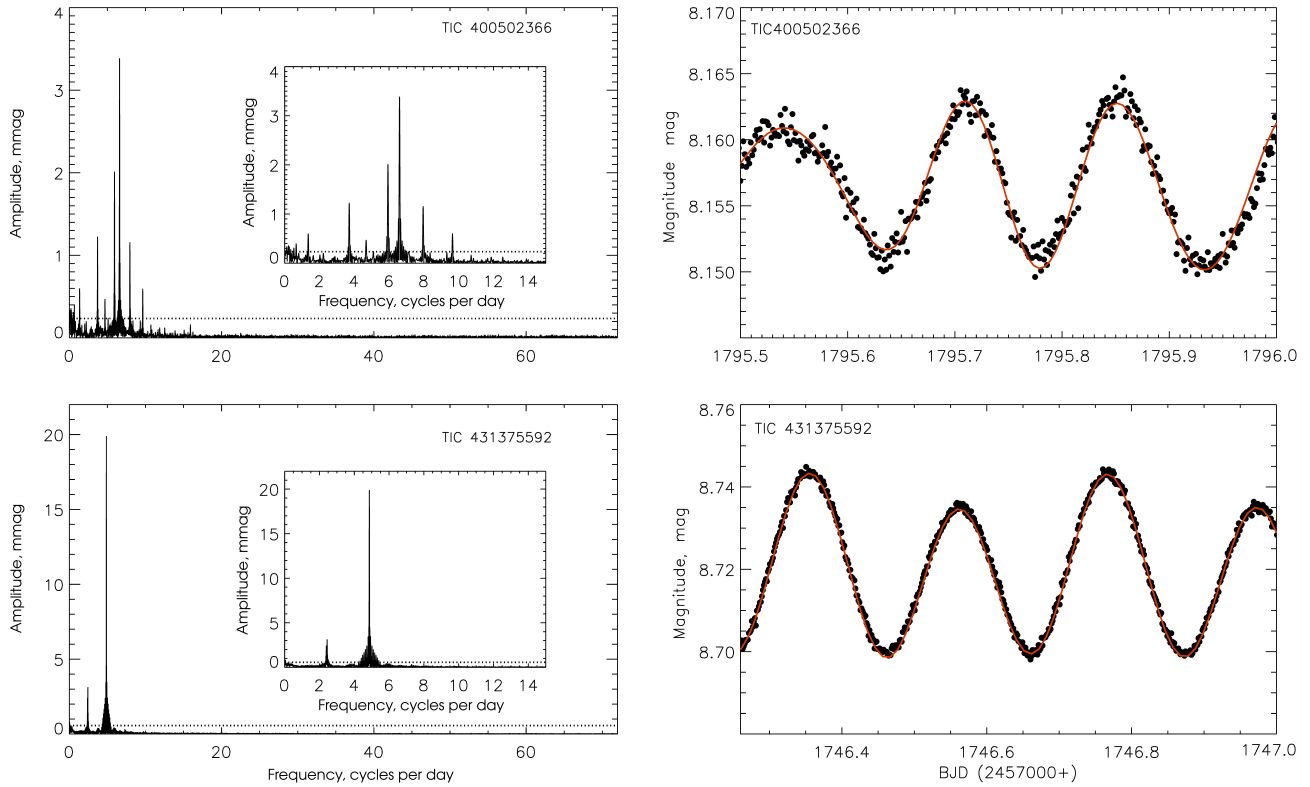


Рис. 1. Продолжение.

Таблица 3. Полученные параметры и классификация объектов

	TIC, number	$A_V$ , mag $\pm$ 0.002	$M_V$ , mag	$M_{bol}$ , mag	$\lg(L/L_{\odot})$	$Q$ , range	Classification
1	25537276	0.08476	$0.906 \pm 0.013$	$0.987 \pm 0.014$	$1.562 \pm 0.033$	0.011–0.025	$\delta$ Scuti
2	177422294	0.09086	$0.615 \pm 0.013$	$0.690 \pm 0.014$	$1.678 \pm 0.033$	0.017–0.037	$\delta$ Scuti
3	252554307	0.04787	$2.149 \pm 0.011$	$2.229 \pm 0.012$	$1.065 \pm 0.031$	0.021–0.056	$\delta$ Scuti
4	279874050	0.04848	$1.713 \pm 0.026$	$1.794 \pm 0.027$	$1.239 \pm 0.046$	0.028–0.031	$\delta$ Scuti
5	308447073	0.03920	$2.631 \pm 0.022$	$2.690 \pm 0.023$	$0.872 \pm 0.042$	0.192–0.212	$\gamma$ Doradus
6	367910480	0.00000	$1.301 \pm 0.010$	$1.273 \pm 0.011$	$1.403 \pm 0.030$	0.021–0.161	Hybrid
7	370599803	0.06602	$1.463 \pm 0.013$	$1.530 \pm 0.014$	$1.339 \pm 0.033$	0.015–0.029	$\delta$ Scuti
8	395520454	0.06427	$2.539 \pm 0.025$	$2.608 \pm 0.026$	$0.909 \pm 0.045$	0.050–0.120	Hybrid
9	400502366	0.16216	$0.276 \pm 0.014$	$0.273 \pm 0.015$	$1.814 \pm 0.034$	0.032–0.465	Hybrid
10	431375592	0.03094	$3.189 \pm 0.011$	$3.255 \pm 0.012$	$0.648 \pm 0.031$	0.103–0.211	Hybrid

числения постоянной пульсации  $Q$ , которая определяется по следующей формуле:

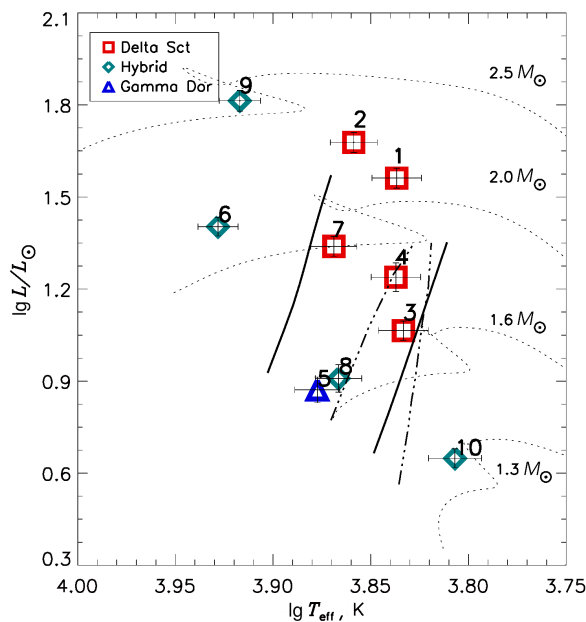
$$Q = P \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_{\odot}}}$$

Это уравнение также может быть задано в виде, представленном в работе Врегер (1990):

$$\lg(Q/P) = 0.5 \lg g + 0.1 M_{bol} + \lg T_{eff} - 6.456.$$

В нашем исследовании значения величины  $Q$  для изучаемых объектов были рассчитаны с помощью приведенного выше уравнения и параметров из таблиц 1 и 3. Для некоторых звезд параметр  $\lg g$  не был получен и мы приняли его равными 4.0. Диапазон рассчитанного значения  $Q$  для каждой звезды приведен в таблице 3. Принимая во внимание частотные спектры и значения  $Q$  для объектов списка, мы провели окончательную классифика-





**Рис. 2.** Положение исследуемых объектов на диаграмме H–R. Значения взяты из таблицы 2. Сплошная и штрихпунктирная линии представляют полосы неустойчивости звезд типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor соответственно (Dupret et al. 2005). Пунктирные линии — эволюционные треки, взятые из работы Kaĥraman Alıçavuş et al. (2016).

цию пульсаций. Константы  $Q$  для звезд типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor отличаются друг от друга. В исследовании Handler and Shobbrook (2002) авторы представили распределения  $Q$  для обоих типов пульсирующих звезд: для звезд типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor значения  $Q$  находятся в диапазонах 0.008–0.063 и 0.200–1.260 соответственно. Мы классифицировали звезды с учетом значений  $Q$  и частотных спектров. Итоги классификации приведены в таблице 3. В результате этих исследований мы нашли пять звезд типа  $\delta$  Sct, одну звезду типа  $\gamma$  Dor и четыре гибридные звезды. Положение звезд также показано на H–R-диаграмме. Как видно на рис. 2, звезды типа  $\delta$  Sct расположены внутри их полосы неустойчивости. Переменная звезд типа  $\gamma$  Dor оказывается очень близко к области, занимаемой подобными ей объектами. Однако гибридные звезды в основном расположены за пределами обеих полос неустойчивости. Этот вывод ожидаем для таких переменных звезд в соответствии с результатом, полученным Uytterhoeven et al. (2011). При этом есть несколько гипотез, объясняющих существование подобных гибридных переменных: ошибочное значение  $T_{\text{eff}}$ , быстрое вращение и двойственность (Lampens et al. 2018; 2020). Надежное объяснение пока не найдено. Кроме того, о возможной переменности одного из исследованных объектов — TIC 431375592, было заявлено в работе .

Мы подтвердили тип переменности этой системы. В результате проведенного исследования мы выявили десять пульсирующих звезд классов A–F, переменность которых ранее не была обнаружена или подтверждена в литературе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

TESS-данные, представленные в этой статье, были получены из архива данных космических телескопов им. Б. Микульской (MAST). Финансирование миссии TESS осуществляется исследовательской программой НАСА. В этой работе использовались данные миссии Европейского космического агентства (ЕКА) (Gaia, <http://www.cosmos.esa.int/gaia>), предоставляемые Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC, <http://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/>). Финансирование для DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности учреждениями, участвующими в многостороннем соглашении Gaia. В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, работающая в CDS, Страсбург, Франция.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Эта работа была частично поддержана Советом по научно-техническим исследованиям (TUBITAK) в рамках гранта № 120F330.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Aerts, J. Christensen-Dalsgaard, and D. W. Kurtz, *Asteroseismology* (Springer Science+Business Media B.V., Springer Dordrecht, 2010).
2. E. B. Amôres and J. R. D. Lépine, *Astron. J.* **130** (2), 659 (2005).
3. V. Antoci, M. S. Cunha, D. M. Bowman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490** (3), 4040 (2019).
4. G. Á. Bakos, J. Lázár, I. Papp, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114** (799), 974 (2002).
5. A. S. Baran and C. Koen, *Acta Astronomica* **71** (2), 113 (2021).
6. W. J. Borucki, D. Koch, G. Basri, et al., *Science* **327** (5968), 977 (2010).
7. M. Breger, *Delta Scuti Star Newsletter* **2**, 13 (1990).
8. M. Breger, *ASP Conf. Ser.*, **210**, 3 (2000).
9. M. Breger and F. Beichbuchner, *Astron. and Astrophys.* **313**, 851 (1996).
10. M. Breger, J. Stich, R. Garrido, et al., *Astron. and Astrophys.* **271**, 482 (1993).

11. S.-W. Chang, P. Protopapas, D. W. Kim, and Y. I. Byun, *Astron. J.* **145** (5), id. 132 (2013).
12. M. A. Dupret, A. Grigahcène, R. Garrido, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, L17 (2004).
13. M. A. Dupret, A. Grigahcène, R. Garrido, et al., *Astron. and Astrophys.* **435** (3), 927 (2005).
14. G. Handler, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **398** (3), 1339 (2009).
15. G. Handler and R. R. Shobbrook, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **333** (2), 251 (2002).
16. F. Kahraman Aliçavuş, E. Niemczura, P. De Cat, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458** (3), 2307 (2016).
17. A. B. Kaye, G. Handler, K. Krisciunas, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (761), 840 (1999).
18. P. Lampens, Y. Frémat, L. Vermeylen, et al., *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege* **87**, 137 (2018).
19. P. Lampens, L. Vermeylen, P. De Cat, et al., in *Proc. Conf. on Stars and their Variability Observed from Space, Vienna, 2019*, Ed. by C. Neiner, W. W. Weiss, D. Baade, R. E. Griffin, C. C. Lovekin, A. F. J. Moffat (University of Vienna, 2020), p. 353.
20. P. Lenz and M. Breger, *Commun. Asteroseismology* **146**, 53 (2005).
21. A. Poro, E. Paki, G. Mazhari, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **133** (1026), id. 084201 (2021).
22. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, et al., *J. Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, id. 014003 (2015).
23. E. Rodríguez and M. Breger, *Astron. and Astrophys.* **366**, 178 (2001).
24. R. L. Smart et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A6 (2021).
25. K. G. Stassun, R. J. Oelkers, M. Paegert, et al., *Astron. J.* **158** (4), id. 138 (2019).
26. K. Uytterhoeven, A. Moya, A. Grigahcène, et al., *Astron. and Astrophys.* **534**, id. A125 (2011).

### Discovery of New $\delta$ Scuti Stars

Ö. Kırmızıtaş<sup>1</sup>, S. Çavuş<sup>1</sup>, and F. Kahraman Aliçavuş<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Sciences and Arts, Physics Department, 17100, Çanakkale, Turkey

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Astrophysics Research Center and Ulupınar Observatory, 17100, Çanakkale, Turkey

Pulsating stars are remarkable objects for stellar astrophysics. Their pulsation frequencies allow us to probe the internal structure of stars. One of the most known groups of pulsating stars is  $\delta$  Scuti variables which could be used to understand the energy transfer mechanism in A–F type stars. Therefore, in the current study, we focused on the discovery of  $\delta$  Scuti stars. For this investigation, we followed some criteria. First, we inspected TESS database by eye and discovered some single stars that exhibit pulsation like behaviour. Our second criterion is  $T_{\text{eff}}$  and  $\log g$  range. The  $\delta$  Scuti stars generally have  $T_{\text{eff}}$  and  $\log g$  value in a range of 6300–8500 K and 3.2–4.3, respectively. Hence, we selected the stars which have TIC  $T_{\text{eff}}$  and  $\log g$  values in these ranges. The other criterion is the pulsating frequency. A frequency analysis was performed for all the candidate stars. In addition,  $M_V$ ,  $L$  and also  $M_{\text{bol}}$  parameters of the target stars were determined to calculate the pulsation constants and show their positions in the H–R diagram. The final pulsation type classification was made by considering the frequency ranges and pulsation constants of the stars. As a result of the study, five  $\delta$  Scuti, one  $\gamma$  Doradus and four hybrid systems were discovered.

Keywords: *stars: variables:  $\delta$  Scuti—stars: oscillations—techniques: photometric*